УДК 621.316.9.01

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ

Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, С.М. Юдин

Томский политехнический университет
E-mail: vra@tpu.ru

Предлагается математическая модель для исследования электрических процессов в сетях с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях с учетом вероятностного характера факторов, определяющих исследуемый процесс. Результаты, полученные с помощью разработанной модели, используются для усовершенствования защиты от замыканий на землю в электрических сетях.

Надежность работы электроустановок и потребителей электроэнергии в значительной степени зависит от уровня эксплуатации распределительных сетей различного вида. Одним из распространенных видов распределительных электрических сетей являются сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. В этих сетях замыкание на землю одной фазы не вызывают непосредственного нарушения работы потребителей. Однако такие однофазные замыкания, если они не будут своевременно выявлены и устранены, могут стать причиной развития повреждения с последующим переходом в аварийное, которое требует немедленного отключения оборудования.

Для решения этой задачи необходима селективная защита от однофазных замыканий с действием на сигнал или на отключение. Принципиальные трудности выполнения селективной защиты в сетях с компенсацией емкостного тока общеизвестны [1]. Важным обстоятельством является также и то, что защита должна правильно функционировать как при устойчивых, так и при дуговых перемежающихся замыканиях.

Разработанный в Томском политехническом университете метод выполнения защиты основан на использовании того обстоятельства, что при дуговом перемежающемся замыкании, представляющем из себя следующие друг за другом зажигания и погасания дуги, имеет место накопление избыточных зарядов на емкостях фаз сети при горении дуги и стекание этих зарядов через дугогасящий реактор после погасания дуги. Процессы изменения зарядов емкостей фаз в каждой линии могут контролироваться через интеграл токов, измеряемых трансформаторами токов нулевой последовательности. Рассмотрение распределения этих токов с учетом их направлений в поврежденной и неповрежденных линиях показало, что суммарное изменение зарядов между двумя пробоями на неповрежденных линиях примерно равно нулю, а на поврежденной линии равно суммарному изменению заряда емкостей фаз сети. Приемлемое по сложности для массового применения устройство с использованием указанного выше обстоятельства выполнено с заменой формирования интеграла токов фильтрацией в области низких частот. Это оказалось возможным в связи с тем, что частота пробоев изоляции при перемежающихся замыканиях в компенсированной сети составляет от ед. до 10...12 Гц и процесс близок к периодическому. Следовательно, признаком для выявления поврежденного элемента является уровень низкочастотных гармоник в токе нулевой последовательности защищаемого элемента [2].

Частота и амплитуда гармонических составляющих токов и напряжений в сетях с компенсацией емкостного тока при перемежающемся замыкании зависят от большого числа факторов и поэтому отличаются большим многообразием. Для выбора частотной характеристики измерительных органов защиты и определения уровня низкочастотных гармоник, при котором защита должна срабатывать, необходимо решать типичную в технике релейной защиты задачу назначения расчетных условий по селективности и чувствительности. Выявить эти условия простым перебором возможных вариантов условий горения дуги и параметров сети в данном случае весьма трудно.

В связи с этим разработана математическая модель с учетом случайного характера факторов, определяющих электрические величины при дуговых замыканиях, и проведены исследования с использованием метода статистических испытаний, который позволил получить расчетные гистограммы плотности распределения исследуемого параметра, в частности, уровня сигнала на выходе измерительного органа защиты. Основой математической модели является комплексная схема замещения сети, составленная на основе метода симметричных составляющих. Дуговое замыкание моделируется ключом, который замыкается при достижении на нем определенного значения мгновенного напряжения, а отключается при заданном прохождении тока замыкания через нуль.

Для реализации вероятностной модели необходимо назначить законы распределения плотности вероятности всех факторов, влияющих на исследуемую величину. Такими факторами являются: пробивное напряжение, частота и коэффициент затухания переходного емкостного тока, момент погасания дуги, скорость изменения пробивного напряжения в бестоковую паузу за счет действия деионизирующих факторов, расстройка компенсации емкостного тока, коэффициент демпфирования колебаний после погасания дуги.

Законы распределения вероятности перечисленных параметров получены на основе статистических данных или физических соображений.

Для получения закона распределения плотности вероятности напряжения пробоя изоляции в месте замыкания были использованы осциллограммы, полученные при замыканиях на землю в реальных компенсированных сетях. На основе анализа статистических данных по пробивному напряжению для этого фактора принят нормальный закон распределения с математическим ожиданием 0,87 и средним квадратичным отклонением 0,242 от амплитуды фазного напряжения.

При определении закона распределения плотности вероятности расстройки компенсации принимались во внимание нормированные требования, предписывающие поддерживать настройку дугогасящего реактора в резонанс с емкостью сети, а также опыт эксплуатации сетей с компенсацией емкостного тока. Максимально возможные отклонения от резонансной настройки зависят от типа применяемых дугогасящих реакторов, методов и технических средств для их регулировки и существенно отличаются друг от друга в сетях с автоматической настройкой и в сетях с ручной ступенчатой регулировкой настройки дугогасящего реактора.

В сетях с компенсацией емкостного тока правилами технической эксплуатации допускается максимальное отклонение от резонансной настройки в пределах ±5 %. Это означает, что если отклонение от резонансной настройки находится в указанных пределах, то может не предприниматься никаких мер для снижения расстройки компенсации. Поэтому зона нечувствительности устройства автоматической настройки может устанавливаться в пределах ±5 %. В этой зоне любое значение расстройки компенсации может иметь место с равной вероятностью. Поэтому для сетей с автоматической настройкой дугогасящего реактора принимаем равномерный закон распределения плотности вероятности расстройки компенсации с диапазоном изменения ±5 %.

В сетях с ручной настройкой дугогасящего реактора, как показывает опыт эксплуатации, при изменении конфигурации сети максимальное отклонение от точной настройки может достигать ±20 %. В компенсированных сетях, оборудованных типовыми дугогасящими реакторами со ступенчатой регулировкой индуктивности, в соответствии с требованиями, стремятся поддерживать резонан-

сную настройку. Можно предположить, что мероприятия по настройке компенсации будут выполняться персоналом тем быстрее, чем больше расстройка, поэтому вероятность попадания замыкания в отрезок времени, когда расстройка велика, меньше, чем при малых расстройках. То есть можно допустить, что математическое ожидание расстройки компенсации равно нулю и в целом распределение плотности вероятности расстройки компенсации описывается нормальным законом. Среднее квадратичное отклонение расстройки компенсации от резонансной при выбранном нормальном распределении и диапазоне изменения определяем по закону 3σ. Для сетей с ручной настройкой дугогасящего реактора среднее квадратичное отклонение принято равным 6,6 %.

Коэффициент демпфирования, зависящий от большого числа случайных факторов (время эксплуатации сети, погодные условия, состояние заземляющих устройств и др.), согласно [3], изменяется в пределах 0,03...0,1. В большинстве электрических сетей изоляция поддерживается в удовлетворительном состоянии, при котором коэффициент демпфирования находится в пределах 0,04...0,07. На этом основании для коэффициента демпфирования был принят нормальный закон распределения плотности вероятности с математическим ожиданием равным среднему значению из возможного диапазона и средним квадратичным отклонением 0,0116.

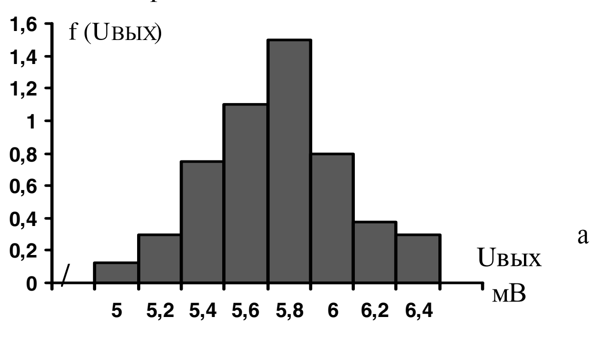
Законы распределения плотности вероятности частоты свободных колебаний и коэффициента затухания переходного тока замыкания принимаем равномерными, так как нет никаких физических причин, которые сделали бы более вероятными какие-то значения этих величин. Диапазоны их изменения приняты в соответствии с данными, полученными в [4].

Время горения дуги принималось исходя из того, что дуга может погаснуть при одном из прохождений тока замыкания через нуль. Так как ток замыкания содержит высокочастотную переходную составляющую с амплитудой, значительно превышающей амплитуду принужденной составляющей промышленной частоты, то при небольшом затухании момент перехода тока через нуль определяется практически высокочастотной переходной составляющей. При таких условиях погасание дуги практически может произойти через время кратное числу полупериодов высокочастотной составляющей. Число полупериодов высокочастотной составляющей, при котором прохождение тока через нуль определяется этой составляющей, уменьшается с ростом ее затухания, поэтому диапазон возможных моментов погасания дуги задается зависящим от коэффициента затухания переходной составляющей емкостного тока.

При одновременном варьировании всех перечисленных выше величин в диапазоне их реальных значений, в соответствии с заданными законами распределения, для каждого случая перемежающегося замыкания рассчитывался сигнал на выходе измерительного канала защиты, представляющий собой сумму гармоник со случайными амплитудами и фазами. В качестве количественной характеристики сигнала на выходе измерительного канала защиты в данной работе принята амплитуда сигнала. Постоянными параметрами при вероятностных исследованиях считались: суммарный емкостный ток сети и собственный емкостный ток защищаемой линии.

Гистограммы распределения плотности вероятности амплитуд напряжений на выходе фильтров защиты на поврежденной и неповрежденных линиях были рассчитаны для сетей с ручной настройкой компенсации, с суммарным емкостным током 100 и 20 А. При этом во всех случаях собственный емкостный ток отдельной линии последовательно принимался равным 5, 10 и 15 А. Также был рассмотрен, представляющий интерес с точки зрения принципиальных возможностей метода, предельный случай, когда практически вся емкость сети сосредоточена в одной линии.

Расчетные гистограммы для двух случаев представлены на рис. 1 и 2.



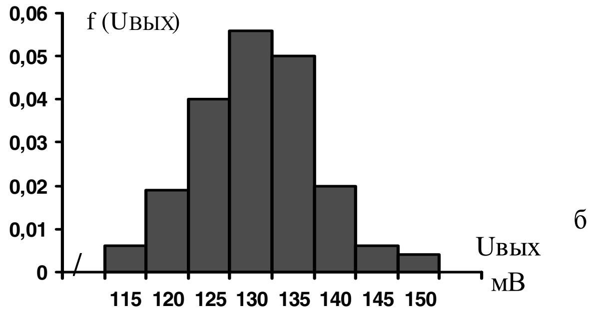


Рис. 1. *Распределение плотности вероятности амплитуд напряжений на выходе измерительного канала защиты для: а) неповрежденных и б) поврежденной линий. Суммарный емкостный ток сети – 100 А, емкостный ток защищаемой линии – 10 А*

Все полученные гистограммы имеют такой вид, что их вполне можно аппроксимировать нормальным законом распределения и далее исследовать влияние различных параметров и структуры защиты на вероятность неселективного действия или отказа защиты. Гистограммы, аппроксимированные нормальными законами, для некоторых перечисленных выше условий расчета приведены на рис. 3.

Во всех рассмотренных случаях гистограммы амплитуд напряжений на выходе фильтров защиты

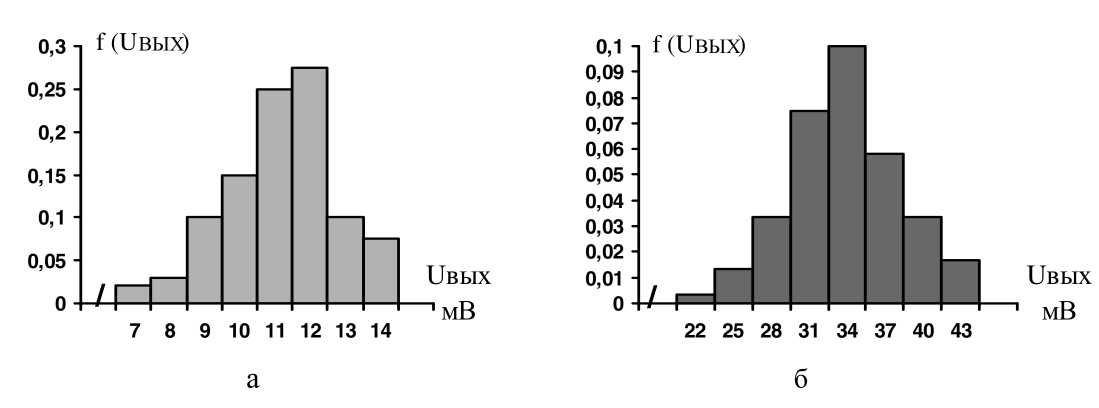
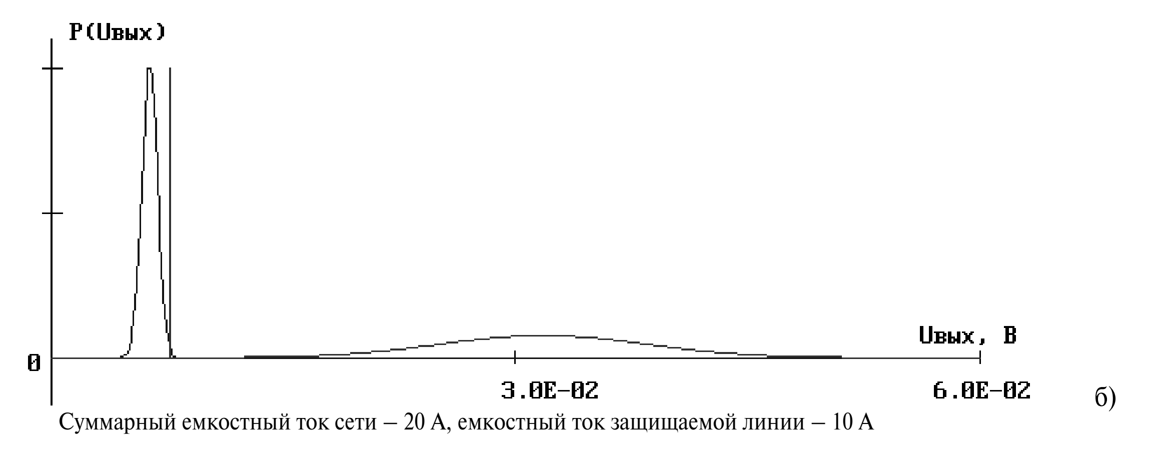


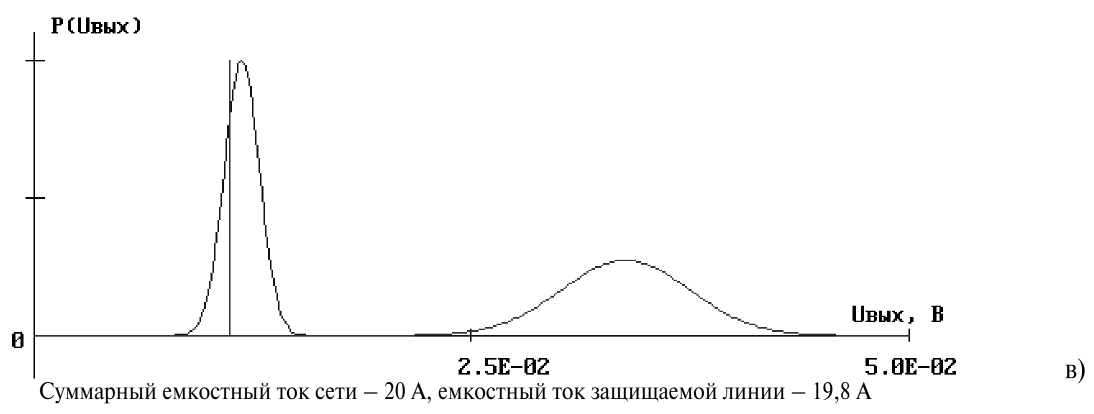
Рис. 2. Распределение плотности вероятности амплитуд напряжений на выходе измерительного канала защиты для: а) неповрежденных и б) поврежденной линий. Суммарный емкостный ток сети – 20 А, емкостный ток защищаемой линии – 19,8 А



Суммарный емкостный ток сети – 100 А, емкостный ток защищаемой линии – 10 А а)



Суммарный емкостный ток сети – 20 А, емкостный ток защищаемой линии – 10 А б)



Суммарный емкостный ток сети – 20 А, емкостный ток защищаемой линии – 19,8 А в)

Рис. 3. Гистограммы, аппроксимированные нормальными законами

в поврежденной и неповрежденных линиях значительно раздвинуты относительно друг друга по оси напряжений на выходе измерительного канала защиты. Следовательно, весьма надежным признаком выявления элемента при перемежающемся замыкании является значительное отличие амплитуды сигнала на выходе измерительного органа защиты в поврежденной и неповрежденных линиях.

Однако для упрощения технического исполнения защиты желательно установить в измерительных органах некоторый определенный порог срабатывания. Во-первых, как видно из гистограмм (рис. 3), установить единый порог, который был бы приемлемым для всех возможных параметров сети, невозможно. Во-вторых, возможность установки порога срабатывания, исходя только из требования правильной работы защиты при дуговых замыканиях, ограничивается тем, что необходимо также обеспечить правильную работу защиты при устойчивых замыканиях.

Работа защиты при устойчивых замыканиях обеспечивается путем наложения на сеть контрольного тока с помощью специального источника, включаемого в цепь дугогасящего реактора [2]. Неизбежные ограничения по мощности этого источника позволяют обеспечить только сравнительно небольшой контрольный ток. Сигнал на выходе измерительного канала, создаваемый контрольным током, при устойчивом замыкании в масштабе, принятом при построении гистограмм, равен 8 мВ.

При принятом токе срабатывания можно определить максимальное значение собственного емкостного тока защищаемой линии, при котором вероятность неселективных действий не будет превышать заранее заданную величину. Например, при суммарном емкостном токе сети 100 или 20 А, собственном емкостном токе линии в обоих случаях 10 А и уровне срабатывания 8 мВ расчетная вероятность неселективных действий защиты составляет около 4 %, а вероятность отказов практически равна нулю (рис. 3, *а*, *б*).

Совершенно очевидно, что увеличение контрольного тока, а, следовательно, и порога срабатывания защиты при прочих равных условиях будет приводить к быстрому снижению вероятности неселективных действий. Это обстоятельство может быть использовано для обоснованного увеличения мощности источника контрольного тока. Так, например, в случае, когда практически вся емкость сети сосредоточена в одной защищаемой линии и ее емкостный ток равен 19,8 А (рис. 3, *в*), вероятность неселективных действий при уровне срабатывания 10 мВ приближается к 90 %. При увеличении порога срабатывания всего в 1,5 раза вероятность неправильных действий снижается до нескольких процентов.

Представленные результаты относятся к определенному варианту выполнения измерительного органа защиты, а именно, варианта, содержащего фильтры с некоторой частотной характеристикой и амплитудный детектор.

Разработанная методика вероятностной оценки работы защиты от замыканий на землю позволяет поставить задачу оптимизации характеристик элементов защиты исходя из условия наименьшей вероятности неправильных действий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976. – 412 с.
2. Вайнштейн Р.А., Головко С.И., Григорьев В.С., Коберник Е.Д., Максимов В.Н., Юдин С.М. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Электрические станции. – 1998. – № 7 – С. 26–30.
3. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.